GaAs MMIC工艺国有化

福建省福联集成电路有限公司

GaAs MMIC工艺国有化的重要性

GaAs MMIC由于其优越的高频、高功率、高线性及低噪声性能，在射频芯片领域具有不可替代的作用。我国芯片自给率很低，**芯片国产化首先要解决的是芯片制造技术的国有化**。

福建省福联集成电路有限公司是国有控股企业，坐落于福建省莆田市，专注于化合物半导体晶圆代工服务，为国内设计公司提供**稳定**的工艺支持，是一家可**长期合作**的晶圆代工企业。

1. 开发了满足**Sub-6GHz**功放设计需求的高线性HBT（异质结双极性晶体管）工艺

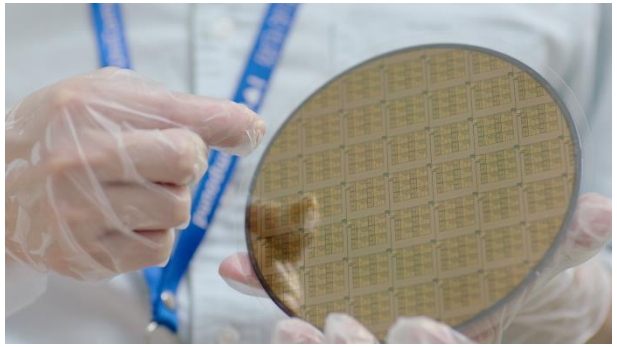
2. 开发0.25um D-mode pHEMT（耗尽型场效应晶体管）工艺，可支持**6GHz**以上功放设计。

3. 开发0.25um E-mode pHEMT（增强型场效应晶体管）工艺，实现了从X波段到Ku波段最小噪声系数小于**0.7dB**的优异噪声性能。

4. 开发0.15&0.1um pHEMT工艺以满足**mmwave**应用需求。

5. 与中国科学院上海微系统与信息技术研究所共同开发**GaAs毫米波PIN开关芯片**技术，该技术将满足毫米波阵列化成像系统、防撞雷达和5G毫米波应用系统对高端开关芯片的需求

福 联
UniCompound



主要内容

1 GaAs毫米波PIN开关芯片技术

2 用于Sub-6GHz功放设计的HBT工艺

3 用于毫米波功放的pHEMT工艺

4 用于射频低噪声放大器的pHEMT工艺

5 福联对工艺的管控能力

6 福联对设计支持平台的建设

1 GaAs毫米波PIN开关芯片技术

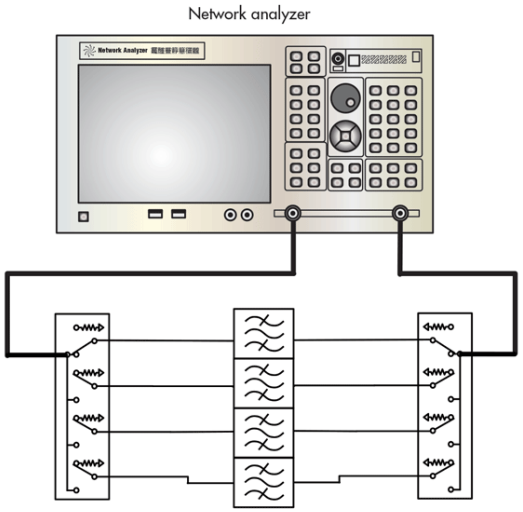
1.1 项目特色

- **开展GaAs基PIN开关芯片研制及产业化**
- 将中国科学院上海微系统与信息技术研究所在材料、器件和电路设计研究上的底蕴与福建省福联集成电路有限公司在化合物半导体先进工艺技术平台优势相结合
- **强强联合，优势互补**
- **推动PIN开关芯片国产化**

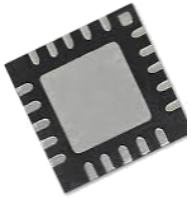
1 GaAs毫米波PIN开关芯片技术

1.2 开关需求背景

- 开关是现代电子系统的关键部件



- 毫米波PIN开关芯片
  - 特点：固态开关，体积小，开关速度快，功率容限高，插损小。
  - 应用广泛：限幅器、移相器、衰减器等微波控制电路



- **毫米波开关芯片是安检电扫成像系统的关键部件**

毫米波人体成像安检仪

↓

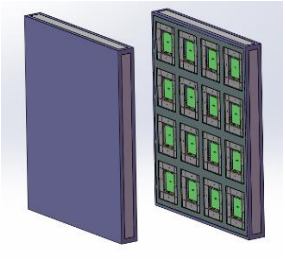
分辨率高 → 足够大的口径

↓

通道数众多 → 大量的开关

↙ ↓ ↘

速度快（ns级） | 插损小（≤2dB） | 功率容量高（≥20dBm） → PIN 开关



- **产业规模大，应用广泛**
  - 安防领域产业规模巨大，毫米波开关芯片需求缺口大。
- **国产化需求迫切**
  - 目前**国内尚无**商业化毫米波PIN开关芯片
  - 主要供货商为美国企业

SKYWORKS®
BREAKTHROUGH SIMPLIC

1.3 开发流程

外延设计
↓
工艺流程
↓
器件建模
↓
电路设计
↓
芯片验证

第一阶段技术指标

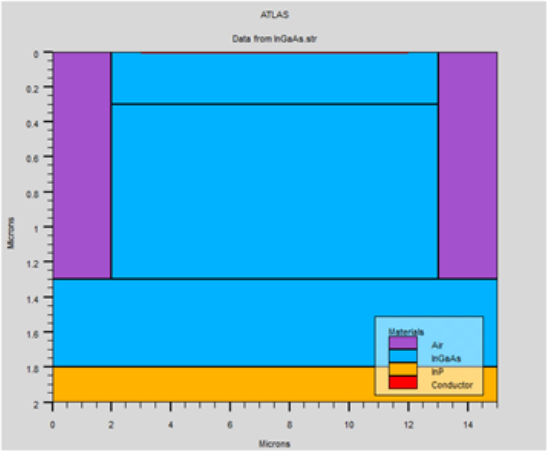
① PIN器件开启电压 V_{on}≤1.2V，击穿电压 V_b≥12V；

② PIN开关芯片插损≤2dB，隔离度≥20dB，工作频率带宽≥4GHz@Ka波段；

① 外延结构设计与验证

- 基于能带工程理论，载流子输运特性
- 结合TCAD软件模拟
- 优化材料结构参数

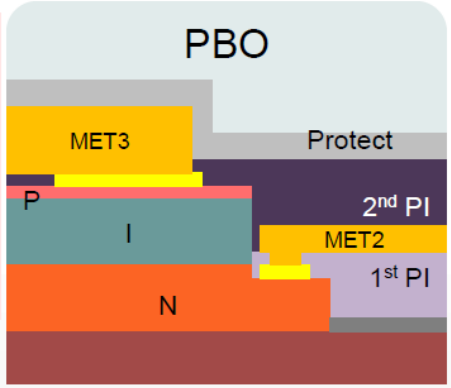
P+ $In_{0.05}Ga_{0.95}As$
P+ GaAs
Undoped (I) GaAs
N+ GaAs
Undoped GaAs buffer
GaAs(100)S.I

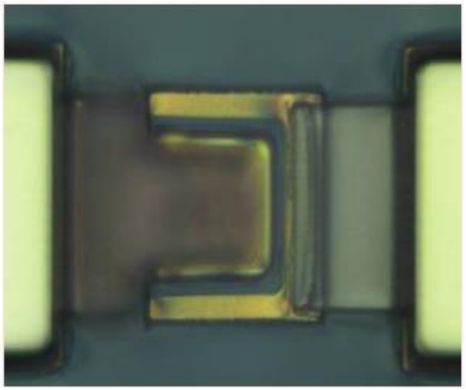


P+ AlGaAs
Undoped (I) GaAs
N+ GaAs
Undoped GaAs buffer
GaAs(100)S.I

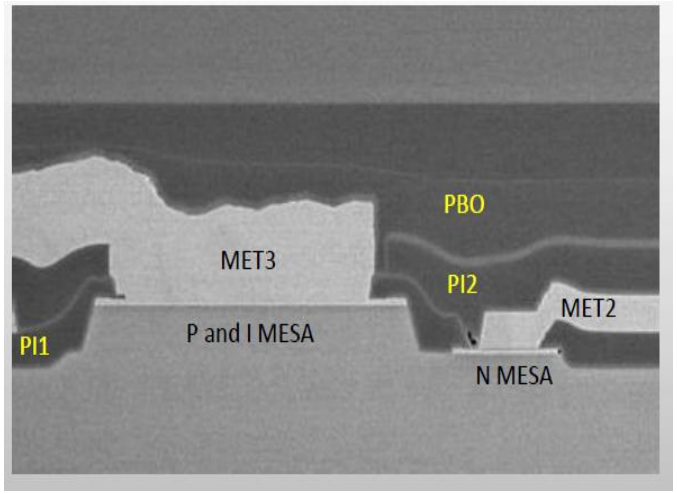
② 工艺流程（福联负责开发）

- 关键工艺
  - 蚀刻
  - 欧姆接触
  - 平坦化
  - 金属沉积



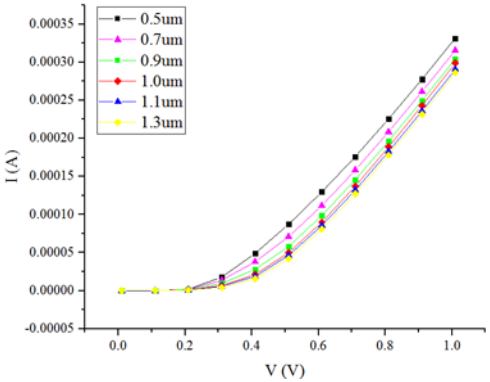


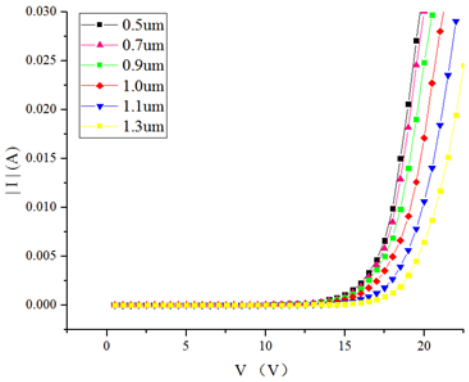
- 工艺监控
  - WAT
  - 成品率
  - PCM工艺监控体系，片内片间良率分析

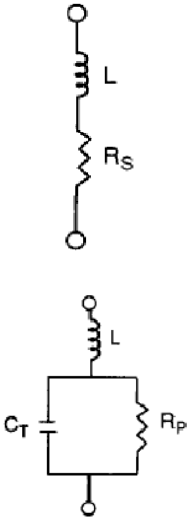


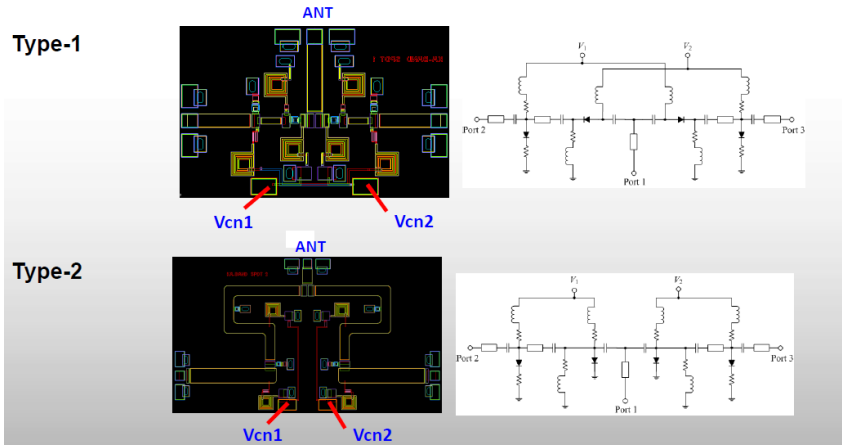
③ 电路设计

- DC直流测试与S参数测试相结合
- 并联、串联和串并结合多种电路结构
- ADS电路仿真



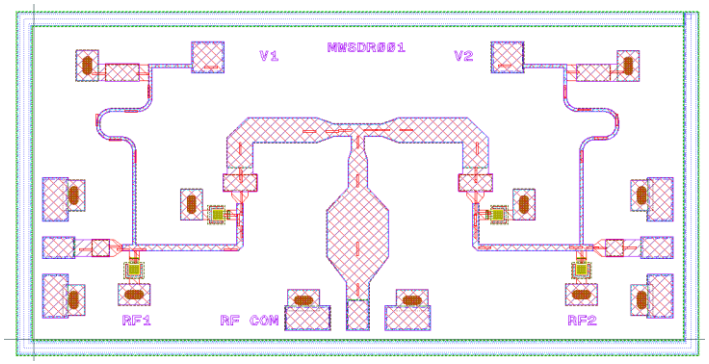






④ 产品测试与可靠性验证

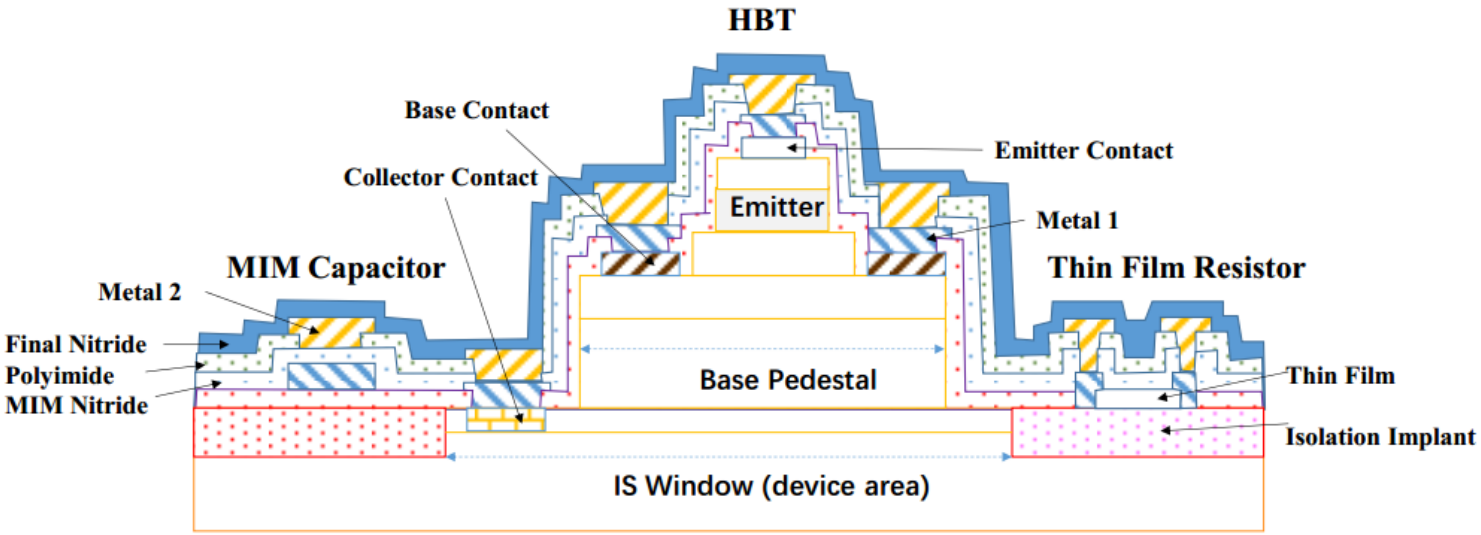
- 综合特性表征分析
- 可靠性特性验证



2 用于Sub-6GHz功放设计的HBT工艺

2.1 福联HBT工艺简介

- 采用InGaP-GaAs异质结发射极，发射极线宽为2um
- 高线性、高电流增益
- 集成薄膜电阻、电容、电感等无源器件



2 用于Sub-6G功放设计的HBT工艺

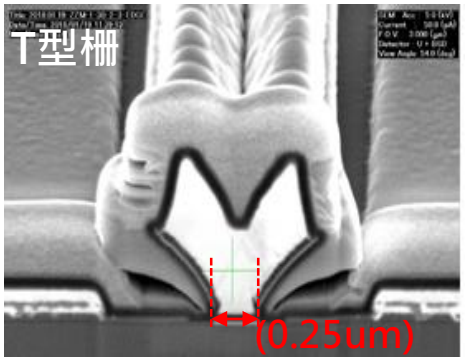
2.2 HBT工艺器件电性

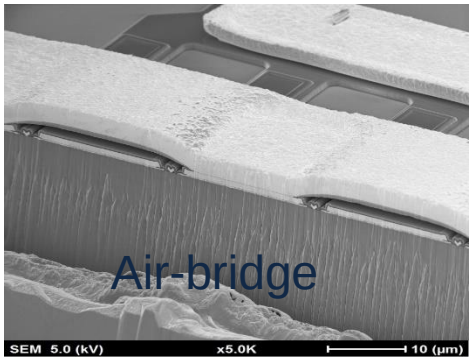
工艺特点		2μm 发射极	
		TaN电阻（50Ω/sq)	
		MiM电容 = 640 或 990 pF/mm2	
		High-Q 电感	
		Metal1=1μm， Metal2=2μm,4μm	
		平坦化工艺	
		晶背穿孔	
		晶背减薄 75μm	
技术参数	产品名称	HH01	HS02
	β	70	110
	Bvceo（V）	14.5	14.5
	Bvcbo（V）	25.5	25.5
	Ft（GHz）	24	29.7
	Fmax（GHz）	53.2	56.2
工作频段		Up to 10GHz	
产品应用		3G/4G/5G手机 & WiFi(802.11a/b/g/n/ac)功率放大器	

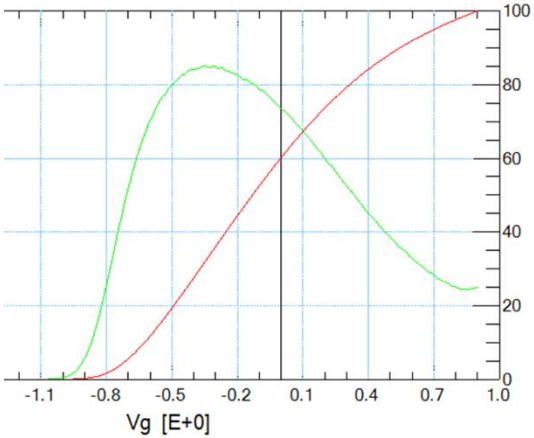
3 用于毫米波功放的pHEMT工艺

3.1 福联Power pHEMT工艺介绍

工艺特点		0.25μm T-gate
		Metal1=1μm Air Bridge(Metal2)=4μm 空气桥
		TaN电阻
		MiM电容 = 350 pF/mm2
		Ron Reduce(PAE提升)
		晶背减薄 75μm
		晶背穿孔
技术参数	产品名称	PD25
	Vp (V)	-1.1
	BVgd (V)	>18
	BVds (V)	20
	GMmax(mS/mm)	390
	Ft (GHz)	>50GHz
	Fmax (GHz)	>100GHz
	Power Density@10GHz	>800mW/mm
产品应用		高频高功率放大设备



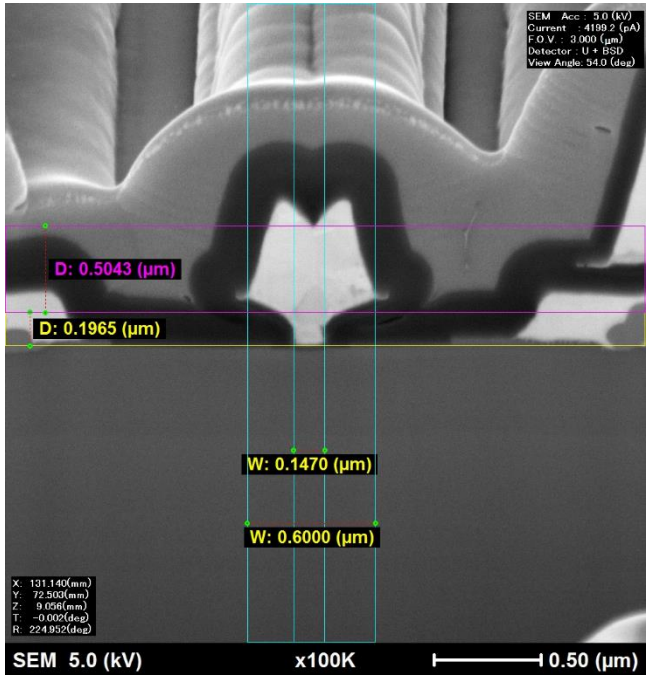


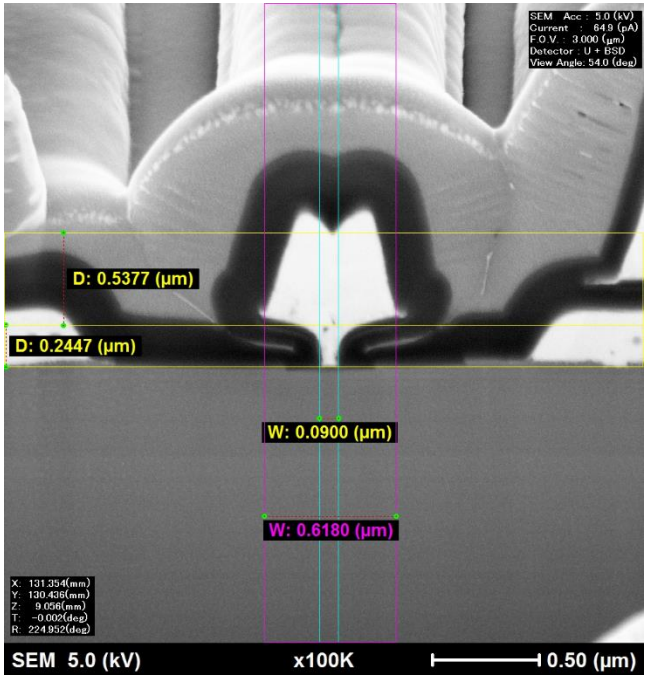


3 用于毫米波功放的pHEMT工艺

3.2 工艺升级

- 为适应更高频段的应用，福联正致力于0.15&0.1um pHEMT工艺开发

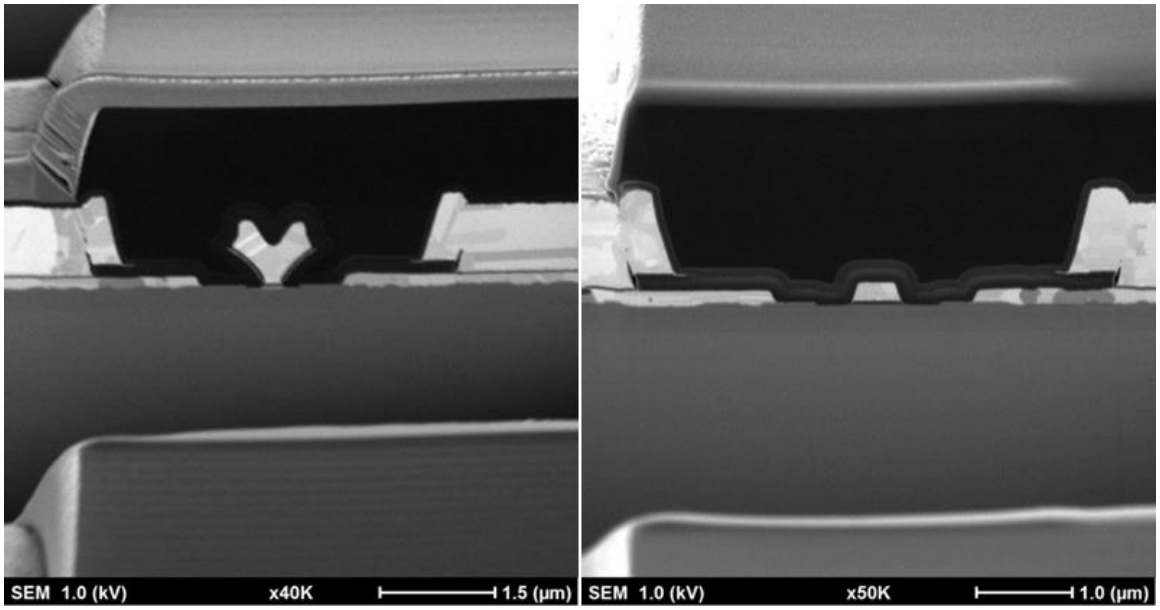




4 用于射频低噪声放大器的pHEMT工艺

4.1 工艺介绍

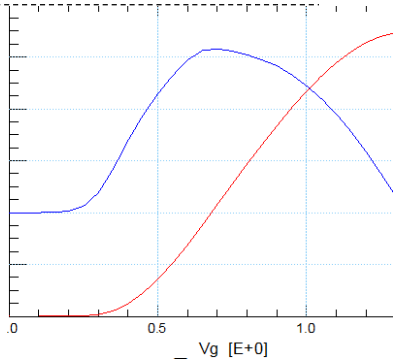
- 开发适用于低噪声应用的pHEMT工艺
- 0.5um D-mode pHEMT和0.25um E-mode pHEMT共存
- NFmin<0.5dB@12GHz
- 两层金属互联，集成薄膜电阻、电容、电感等无源器件

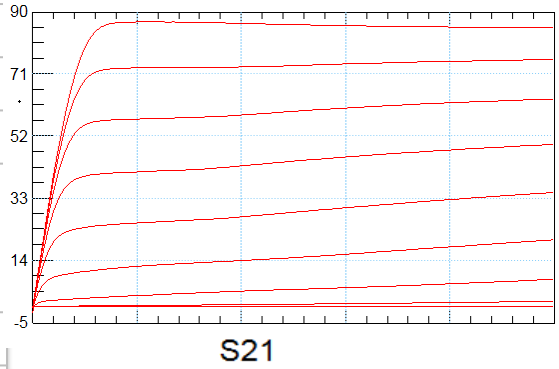


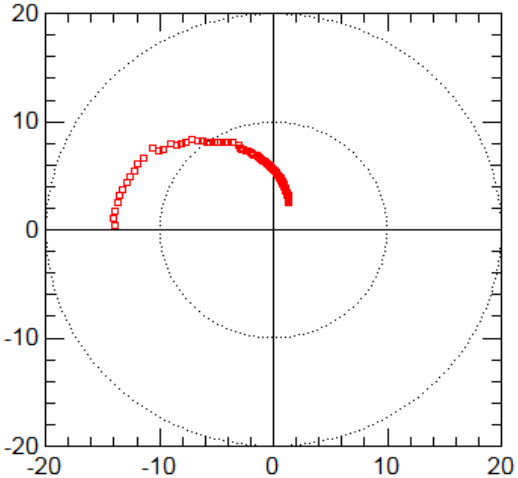
4 用于射频低噪声放大器的pHEMT工艺

4.2 器件电性

工艺特点		0.25μm T-gate	
		0.5um D-gate	
		TaN电阻	
		Stack MIM and MIM Cap.	
		晶背穿孔	
		晶背减薄 75μm 或 100um	
技术参数	产品名称	PF25 & PE25	
	栅极种类	增强型 (T-gate)	耗尽型(D-gate)
	Vth/Vp (V)	0.25	-1
	BVgd (V)	16	16
	GMmax(mS/mm)	830	430
	NFmin	<0.5dB@12GHz	-
	Ft (GHz)	70	33
	Fmax (GHz)	90	40
产品应用		LNA, Switch ...	

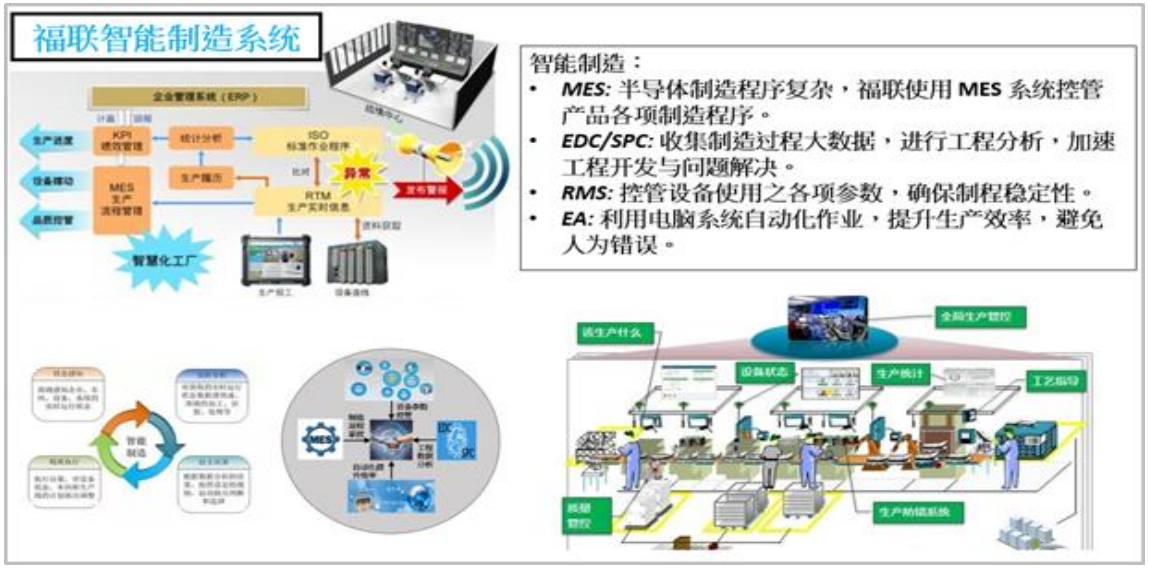


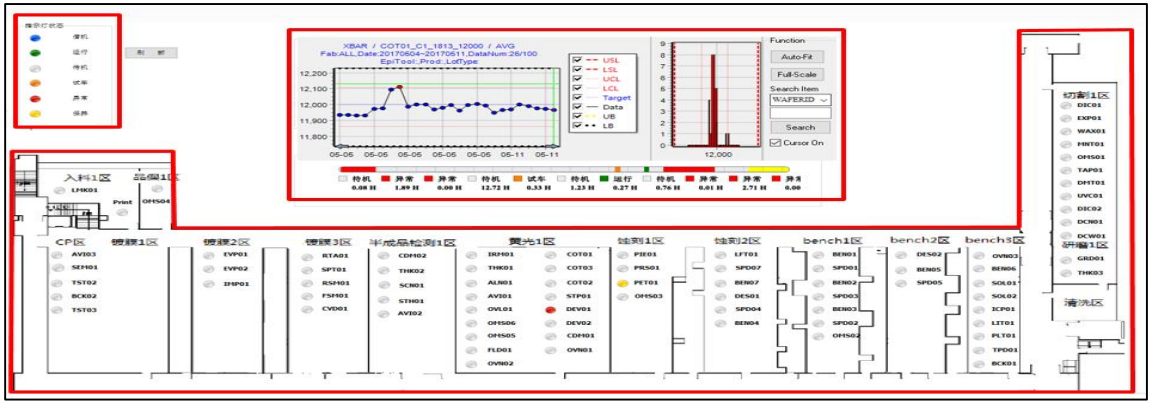




5 福联对工艺的管控能力

5.1 工艺管理系统(Base Line Management System)@UniCompound





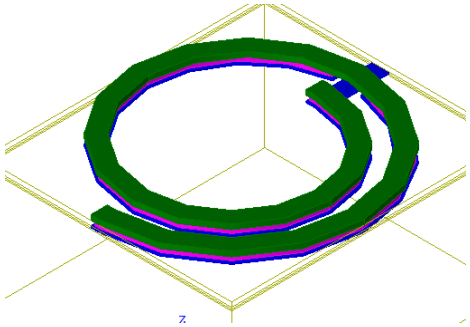
Fab Change Control Board

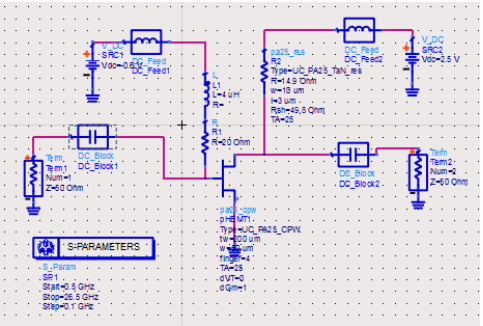
6 福联设计支持平台的建设

6.1 MMIC的分工

- Design House：芯片设计者负责电路设计和仿真
- GaAs Foundry：提供芯片制造技术和服务，且必须提供必要的设计支持
- Foundry提供EM仿真所须的材料和几何参数
- Foundry提供器件模型，包含大信号模型和噪声模型

MMIC仿真=器件模型+EM仿真

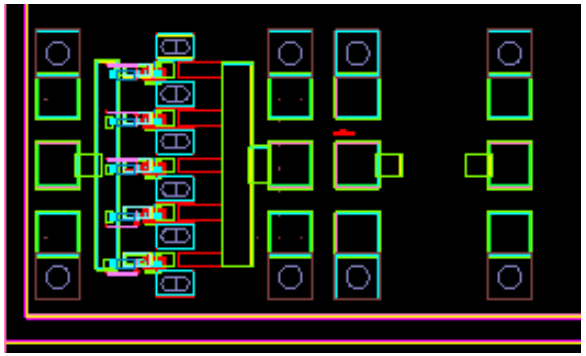


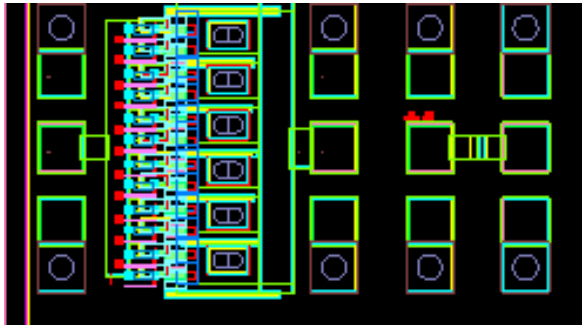


6 福联设计支持平台的建设

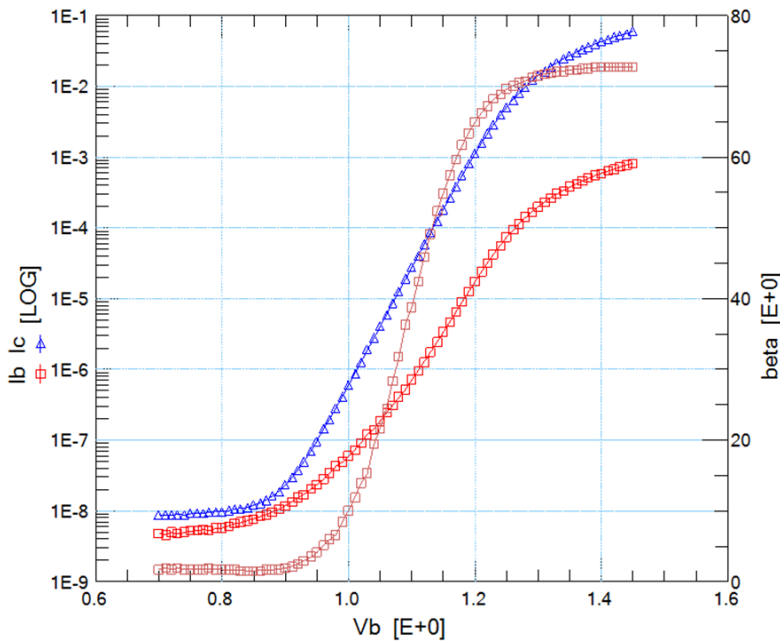
6.2 On-wafer功率放大器验证（负载牵引的必要性）

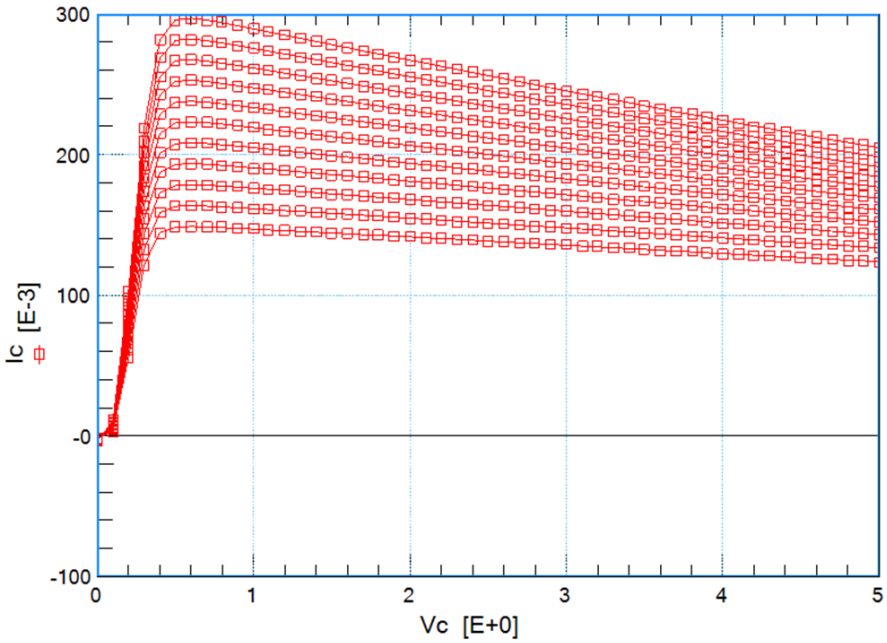
- 将HBT 3X40X3作为功率放大器的单元
- 对HBT 3X40X3进行DC、RF测试获得VBIC模型
- 对功放单元进行负载牵引仿真
- 根据器件模型仿真推测出1W输出功率的功率放大器需要5个单元并联。
- 绘制版图（采用5和12个单元并联），采用on-wafer测试结构
- 流片后，进行测试

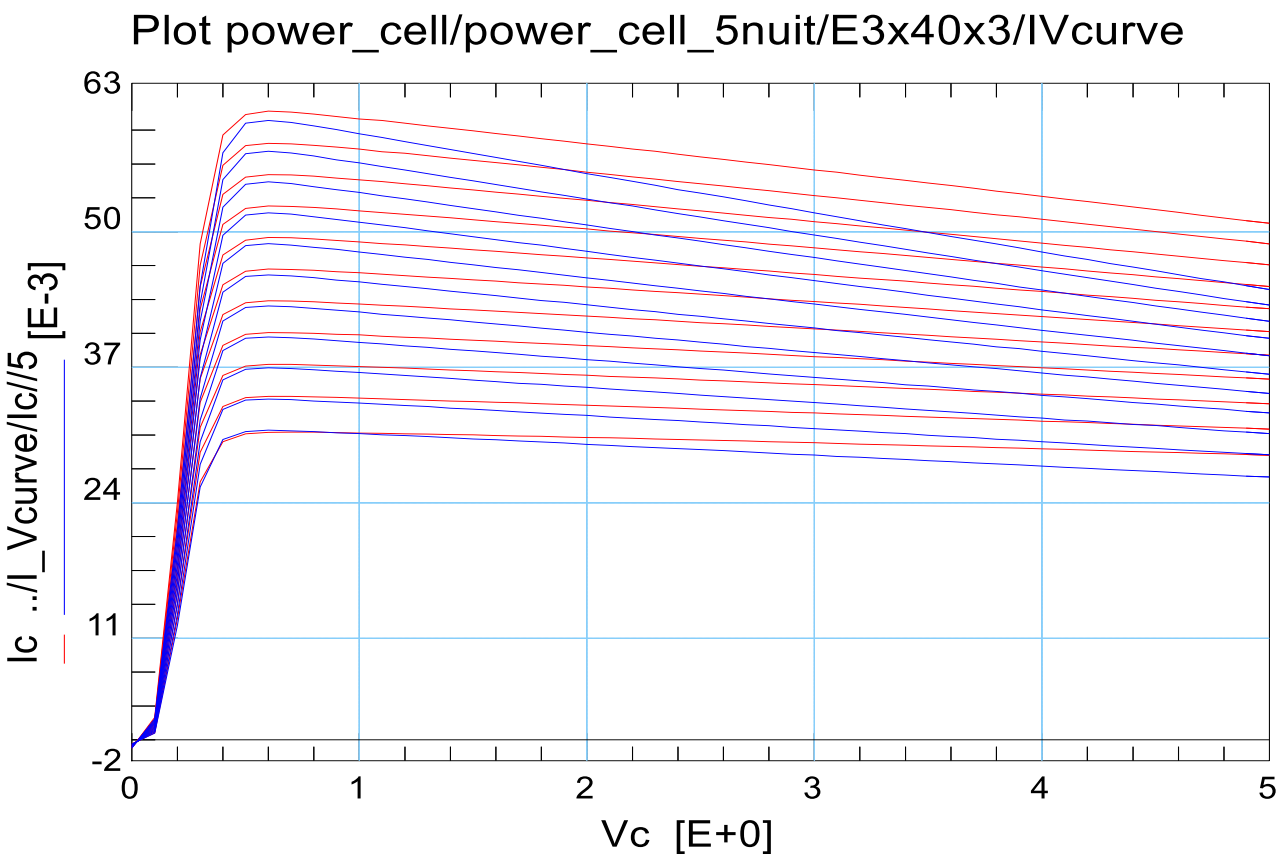




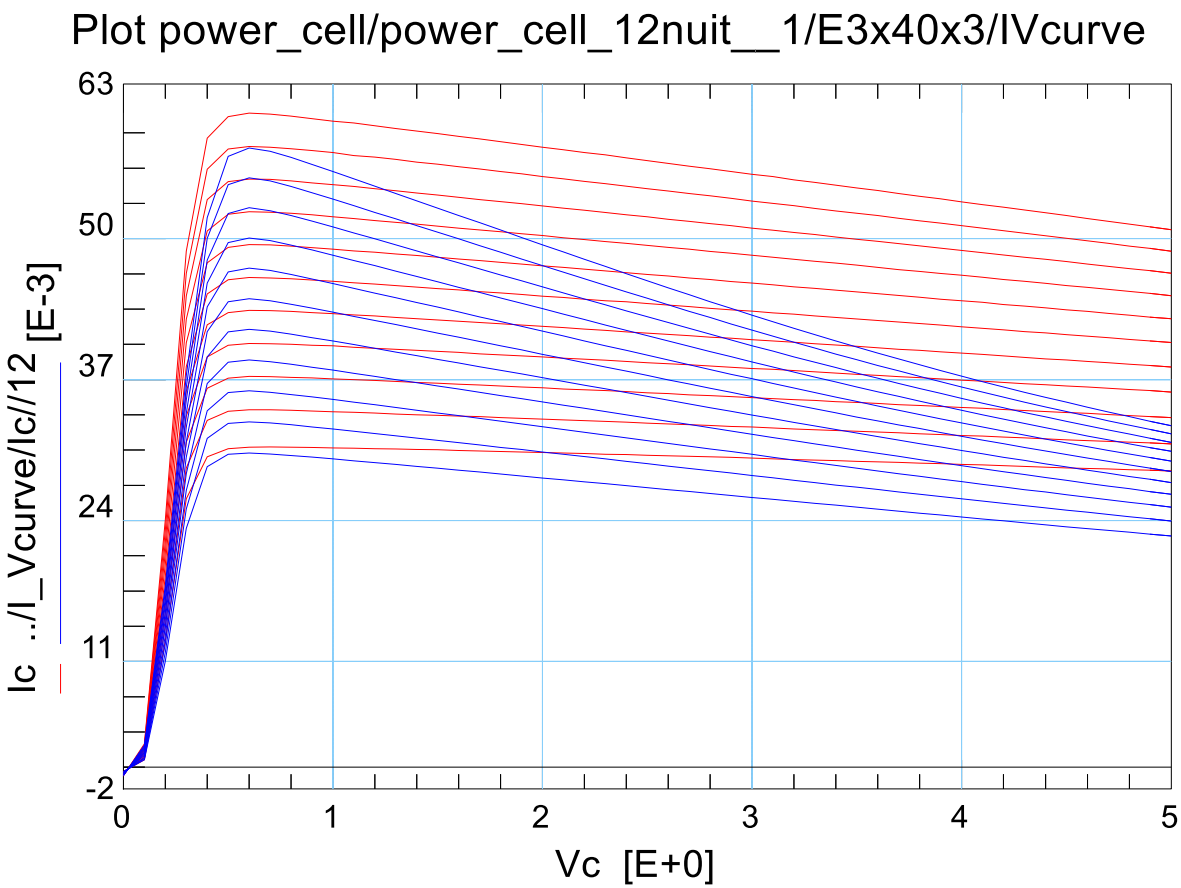
6.3 功率放大器（5个单元）直流测试



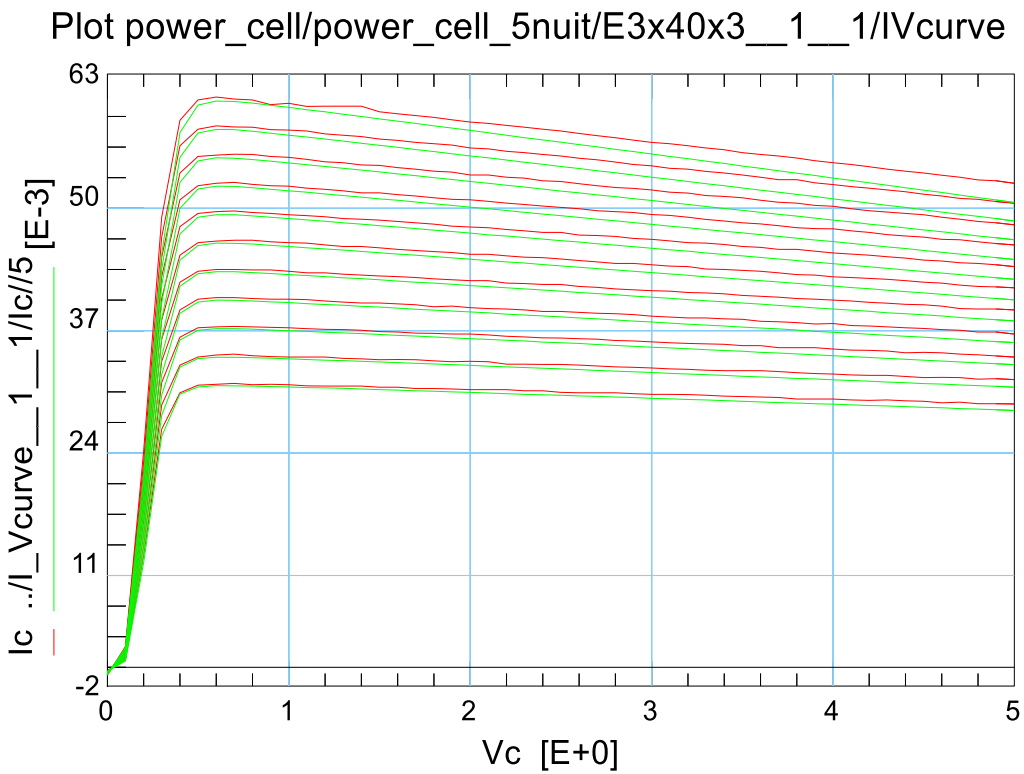




当注入相同的基极电流时，五颗同时工作和一颗单元单独工作时的集电极电流有差异。



当同时工作的管子数目增加到12颗，差异更加明显。



当采用500us脉宽的pulse进行测试时，差异趋于减小。

功放管工作时，所有功放单元同时发热，并且相互作用，每个功放单元所处的温度条件偏离建模时的温度，从而造成仿真不准确。

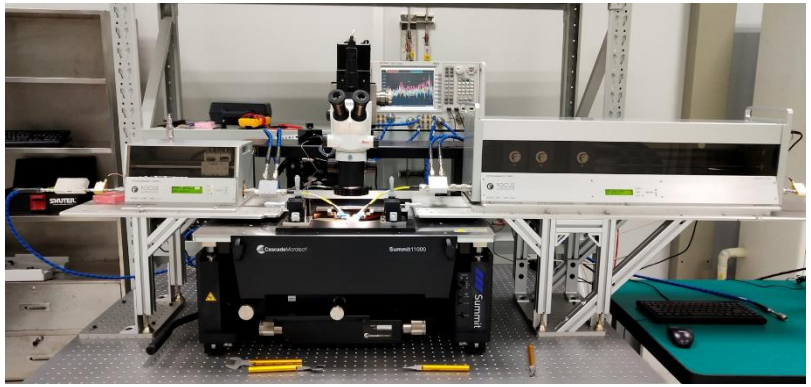
要解决这个问题，可以从以下几个方面着手：

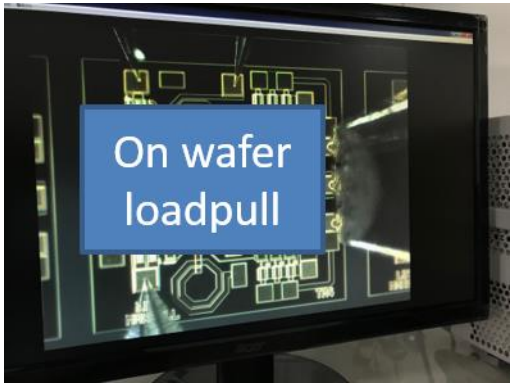
- 开启模型的热节点，提取等效热容热阻
- 采用keysight电热仿真技术
- 负载牵引测试

6 福联设计支持平台的建设

6.4 福联建立了对合作伙伴开放的负载牵引测试系统

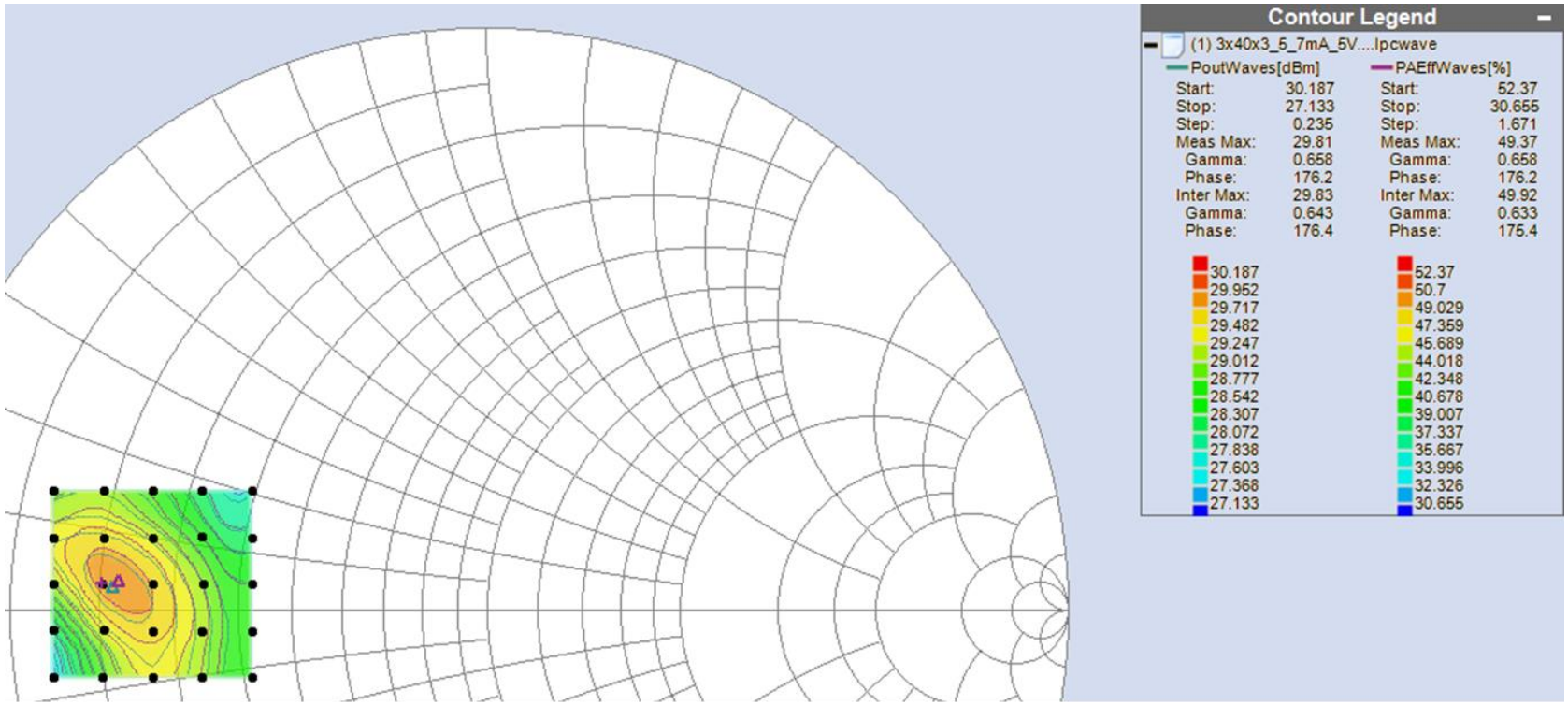
- Sub-6GHz功放调试
- 三次谐波负载牵引
- 支持在片或板级测试



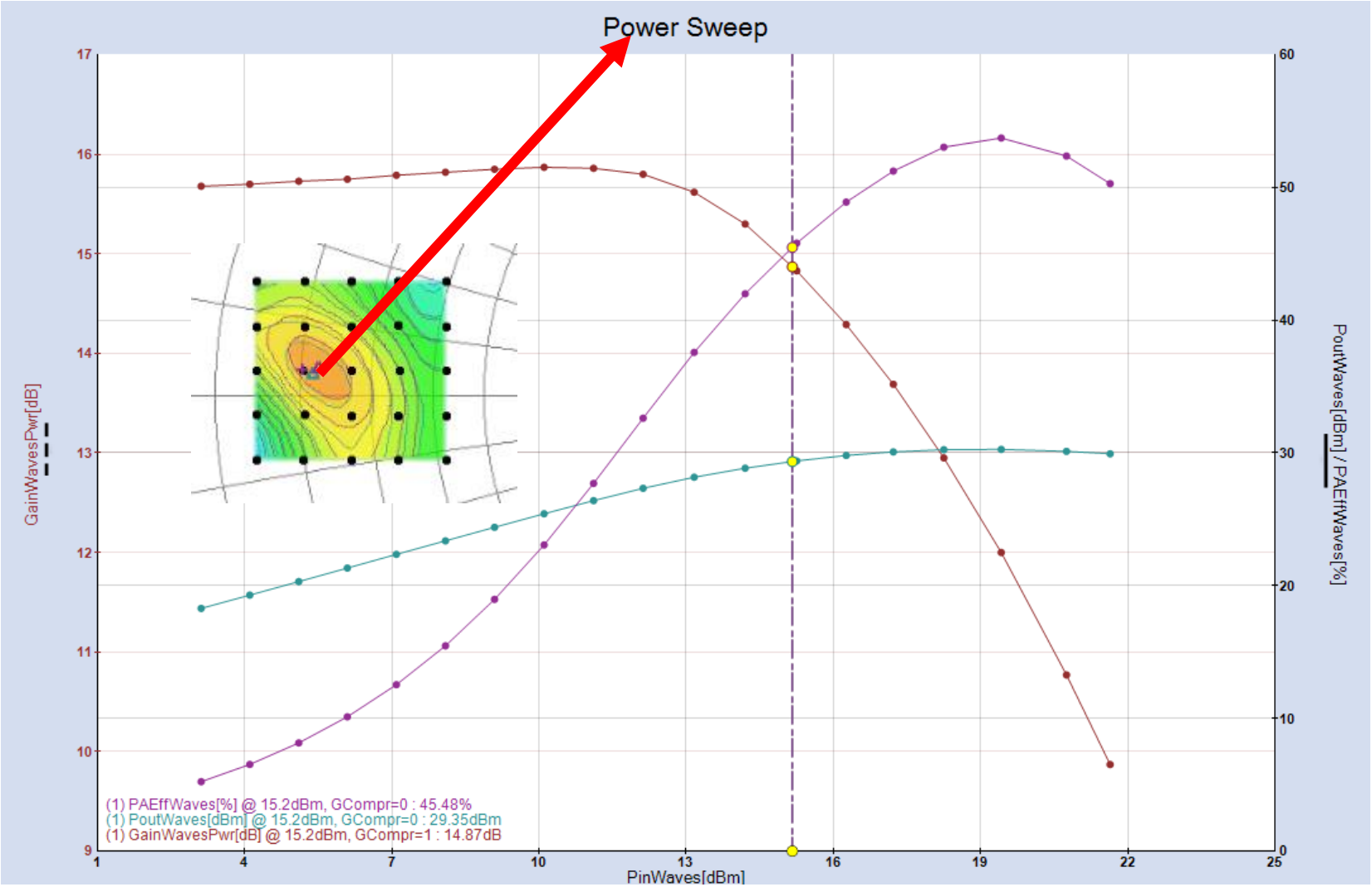


- 支持调制信号测试的系统正在搭建中

5个功放单元在片负载牵引测试(F0=3.5GHz)



Freq=3.5GHz；Ic=235mA；Vc=5V



在最佳负载阻抗点进行功率扫描测试获得P_o1dB=29.35dBm；P_o3dB=30.25dBm ;Gain@P1dB=14.87dB；PAE@P1dB=45.48%

6.5 GaAs晶体管的噪声模型

- **HBT**
  - VBIC
  - Agilent-HBT
- **pHEMT**
  - EEHEMT
  - Angelov(Angelov_gan)

$$\frac{\langle i_b^2 \rangle}{\Delta f} = 2qI_B \qquad \frac{\langle i_c^2 \rangle}{\Delta f} = 2qI_C$$

$$\frac{\langle i_{ds}^2 \rangle}{\Delta f} = \frac{8kTg_m}{3}$$

$$\frac{\langle i_d^2 \rangle}{\Delta f} = 4kTLw\sqrt{\frac{T'_D}{T}}I_{dtn} + Td1 \cdot I_{dtn}^2$$

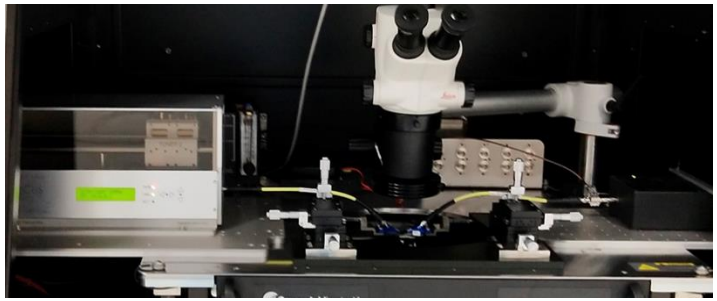
$$\frac{\langle i_d^2 \rangle}{\Delta f} = 4kTg_m\, NoiseP$$

$$\frac{\langle i_g^2 \rangle}{\Delta f} = 4kT\, C_{gs}^2\, \omega^2\, NoiseR/g_m$$

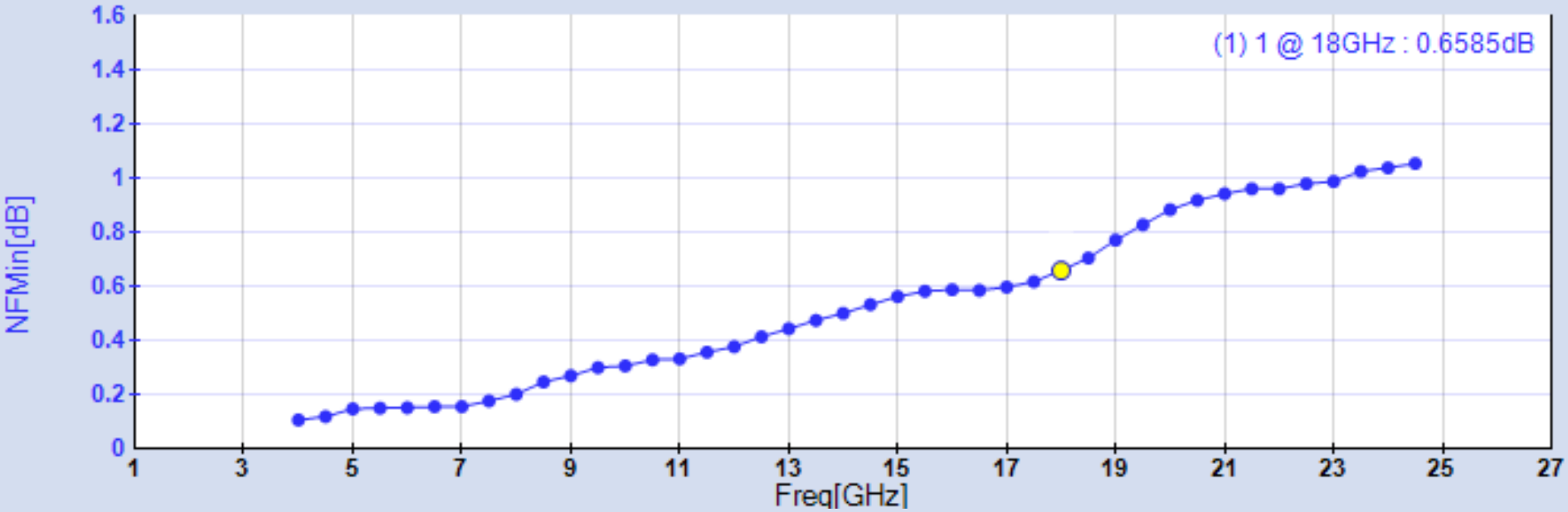
$$\frac{\langle i_g, i_d^* \rangle}{\Delta f} = jNoiseC4kT\, C_{gs}\, \omega\sqrt{NoiseP \cdot NoiseR}$$

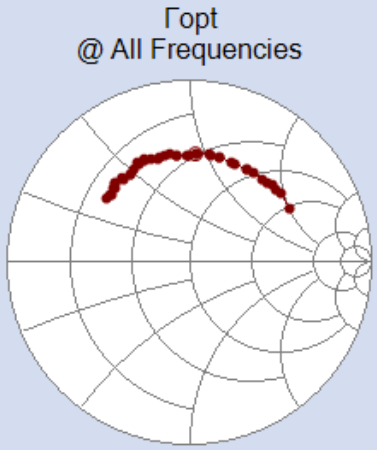
6.6 福联建立了噪声参数量测系统

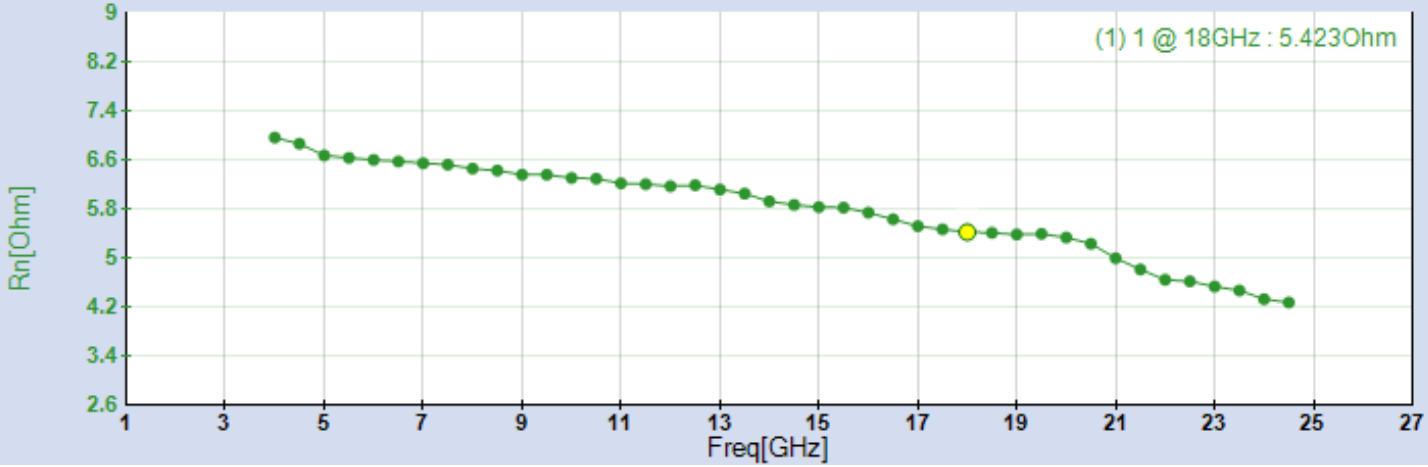
- 支持到26GHz
- 冷源法测噪声系数
- 结合阻抗调谐器，提取四个噪声参数（NFmin，Γopt，Rn）
- 去嵌入到管子的参考端面，扣除测试pad的影响
- 支持在片或板级测试
- 用于噪声建模
- LNA调试



一颗0.25um E-mode pHEMT的噪声参数







6.7 福联的PDK

- 福联已发布HBT、pHEMT、IPD多支工艺的PDK
- 可缩放的HBT大信号模型
- 可缩放的pHEMT大信号模型
- 支持ADS做电路原理图设计和layout EM仿真
- 支持netlist和GDS导出，在Cadence进行LVS和DRC

推动射频芯片国产化的化合物半导体晶圆代工厂

福联集成

UniCompound